

薄膜干涉中附加光程差及干涉条纹公式分析

冯立芹 李春芝

(内蒙古民族大学数理学院, 内蒙古 通辽 028000)

摘 要 现行许多教材对薄膜干涉中附加光程差和干涉条纹公式的表达书写不够统一,使得学生在学习过程中,对半波损失引起的附加光程差的表达及干涉级次的理解存在一定的困惑。针对此种情况,本文就薄膜干涉中半波损失相关的干涉级次问题,结合干涉级次取值特点及物理意义,详细地分析了薄膜干涉中存在半波损失时附加光程差的不同表达式,给出了不同附加光程差表示下干涉条纹公式的具体形式,对学生理解具有半波损失的干涉有一定的指导作用。

关键词 薄膜干涉;半波损失;附加光程差;干涉条件

ANALYSIS OF ADDITIONAL OPTICAL PATH DIFFERENCE AND INTERFERENCE FRINGE FORMULAS IN THIN FILM INTERFERENCE

FENG Liqin LI Chunzhi

(School of Mathematics and Physics, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000)

Abstract The expression of the additional optical path difference and interference fringe formula in thin film interference are not unified in many current textbooks, which makes students confused about the expression of the additional optical path difference caused by half wave loss and the understanding of the interference order. In view of this situation, combined with the characteristics and physical significance of the value of the interference order, this paper analyzes in detail the different expressions of the additional optical path difference when there is half wave loss in thin film interference, and gives the specific forms of the interference fringe formula under the expression of different additional optical path difference. It is helpful for students to understand the interference with half wave loss.

Key words thin film interference; half-wave loss; additional optical path difference; interference condition

分析薄膜干涉相干光光程差问题时,需要考虑由于半波损失的出现而引入的附加光程差。现行的各种版本的教材在讨论薄膜干涉时,对附加光程差和干涉条件表达式的书写不够统一,也不够完备。比如,教材^[1-4]采用加 $+\frac{\lambda}{2}$ 表示附加光程差,教材^[5]在讲解薄膜干涉明暗纹条件时以 $-\frac{\lambda}{2}$

表示附加光程差,但在例题中却采用 $+\frac{\lambda}{2}$ 表示附加光程差。不同的表达使得学生理解起来比较迷茫。文献^[6-10]对半波损失及由于半波损失导致的附加光程差问题从不同角度进行了分析探讨,但对于附加光程差取 $\pm\frac{\lambda}{2}$ 有何区别并未谈及。教材^[3-4]指出,具体计算附加光程差时,取 $\pm\frac{\lambda}{2}$ 只会

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 内蒙古自治区教育科学研究“十三五”规划课题(2020MGH025)。

作者简介: 冯立芹,女,副教授,主要从事物理教学科研工作,研究方向为理论物理。fengliqin1974@163.com。

引文格式: 冯立芹,李春芝. 薄膜干涉中附加光程差及干涉条纹公式分析[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 46-48.

Cite this article: FENG L Q, LI C Z. Analysis of additional optical path difference and interference fringe formulas in thin film interference [J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 46-48. (in Chinese)

影响 k 的取值,对同一条条纹,两种表达式得出的 k 值不同。对于这种解释,笔者认为欠妥,因为同一条条纹, k 值应该是相同的,否则,级次 k 就失去了物理意义。曹冬梅^[11]指出,有的地方附加光程差取负号,有的地方取正号是不矛盾的,只是为了满足规定级次从零开始取值而已,这种解释也不够具体。本文重点对半波损失问题中以 $+\frac{\lambda}{2}$ 和 $-\frac{\lambda}{2}$ 表示附加光程差的差别给出具体解释,并进一步结合级次 k 的取值,对不同情况下干涉条件给出具体表达结果。这将有助于学生更深入理解干涉条件及半波损失所导致的附加光程差问题。

1 干涉相长相消条件及级次 k 的物理意义

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2} & k=0,1,2\cdots \quad \text{干涉相长} \\ \Delta = \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2} & k=0,1,2\cdots \quad \text{干涉相消} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, k 称为干涉级次。式中“ $\pm$ ”符号既反映了两束相干光到达相遇处的位相关系,又反映出同一级次条纹对称分布于零级条纹两侧。即相干光抵达观察屏某一侧条纹的光程差始终大于零,而抵达另一侧对称处的光程差与之相等并且始终小于零。所以,若叠加区域的光程差只存在始终大于零(或小于零)的情况,则条纹公式中将不会出现“ $\pm$ ”符号^[12]。

式(1)给出的是两束相干光发生干涉时,干涉相长(明纹)和干涉相消(暗纹)条件的一般通式。在具体干涉问题中,干涉条件需要结合级次 k 的取值及条纹定域范围写成其他形式。

因为零级条纹对应的是光程差为零的情形,某种意义上反映了条纹分布的对称性,所以在存在光程差为零的薄膜干涉中,比如劈尖干涉,干涉级次 k 的取值应该从零开始。零级条纹要么是明纹,要么是暗纹,但零级明纹和零级暗纹不能同时存在。

2 薄膜干涉中附加光程差分析

设折射率为 n_2 的薄膜分别处于折射率为 n_1 和 n_3 的介质中,入射光垂直入射(为方便叙述,设入射

角为零度)到厚度为 e 的薄膜上,则经薄膜上下两个表面反射的两束反射相干光的几何光程差为

$$\Delta = 2n_2e \quad (2)$$

其中, n_1, n_2, n_3 的大小关系决定着附加光程差的不同,考虑附加光程差后,可以将两束反射相干光的光程差表达如下

$$\Delta = 2n_2e + \frac{P\lambda}{2} \quad (P=0, \pm 1) \quad (3)$$

其中, $\frac{P\lambda}{2}$ 表示附加光程差。

若折射率关系满足 $n_1 < n_2 > n_3$ 或 $n_1 > n_2 < n_3$ 即薄膜处于比自身折射率小或大的介质中时,光从薄膜上表面或下表面反射时会出现半波损失,只能出现一次半波损失,这种折射率关系,对应式(3) $P = \pm 1$ 情形;若折射率关系满足 $n_1 < n_2 < n_3$,则光在薄膜的上、下表面反射时都各自产生一次半波损失,共发生两次半波损失,偶数次半波损失相当于未产生附加光程差,若 $n_1 > n_2 > n_3$,则光在上下表面反射时都不发生半波损失,故没有附加光程差,此两种情况对应式(3)的 $P=0$ 情形。下面,针对附加光程差的这三种情形,对薄膜干涉干涉条件及级次 k 的取值给出具体分析。

3 薄膜干涉干涉条件与级次 k 的关系分析

因为薄膜干涉分析的是经薄膜上、下两个表面分别反射的两束反射光(或两束透射光)产生的干涉,条纹的级次分布不具有对称性。所以对于薄膜干涉,两束反射光(或两束透射光)的光程差只可能等于或大于零,因而在薄膜干涉公式中,无论是明纹还是暗纹,均不会出现“ $\pm$ ”号。

3.1 薄膜干涉无附加光程差

如果薄膜干涉无附加光程差,则对应于 $e=0$ 处,零级条纹一定是明纹,故明纹级次 k 需从 0 开始取值,根据明暗纹分布特点,暗纹级次 k 需从 1 开始连续取值。故干涉相长条件可表达如下

$$\Delta = 2n_2e = 2k \frac{\lambda}{2} \quad k=0,1,2\cdots \quad (4)$$

干涉相消条件可表达如下

$$\Delta = 2n_2e = (2k-1) \frac{\lambda}{2} \quad k=1,2\cdots \quad (5)$$

此时干涉相消条件如果按照 $\Delta = 2n_2e = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$ $k=0,2\cdots$ 式表达,明显出现一明一暗两个零级条纹,不符合条纹分布的对称性规律。

3.2 薄膜干涉有附加光程差

如果薄膜干涉有附加光程差,则对应于 $e=0$ 处,零级条纹一定是暗纹。故暗纹级次 k 需从 0 开始取值,根据明暗纹分布的特点可知,明纹级次 k 需从 1 开始连续取值。

若附加光程差以 $+\frac{\lambda}{2}$ 表示,则干涉相长条件表示为

$$\Delta = 2n_2e + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, \dots \quad (6)$$

干涉相消条件表示为

$$\Delta = 2n_2e + \frac{\lambda}{2} = (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

若附加光程差以 $-\frac{\lambda}{2}$ 表示,则需将干涉条件修正为

$$\Delta = 2n_2e - \frac{\lambda}{2} = 2(k-1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, \dots \quad \text{干涉相长} \quad (8)$$

$$\Delta = 2n_2e - \frac{\lambda}{2} = (2k-1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad \text{干涉相消} \quad (9)$$

如果此时仍采取 $\Delta = 2n_2e - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}, k = 1, 2, \dots$ 表示干涉相长条件,显然漏掉了光程差等于零的一级明纹,即紧临中央暗纹的一条明纹。

通过式(4)~式(9)可以看出,对于薄膜干涉,干涉条件中不存在“ $\pm$ ”符号,这是由薄膜干涉条纹的定域分布特点决定的。比较附加光程差以 $+\frac{\lambda}{2}$ 表示的干涉条件和附加光程差以 $-\frac{\lambda}{2}$ 表示的干涉条件可知,附加光程差以 $+\frac{\lambda}{2}$ 表示时,干涉条件更为简洁,也与干涉条件的通式更相符。这也是一般教材为何以 $+\frac{\lambda}{2}$ 表示附加光程差的原因。

4 结语

通过以上分析可知,对于存在奇数次半波损失的情况,附加光程差写成 $+\frac{\lambda}{2}$ 或 $-\frac{\lambda}{2}$ 理论上都可以,对问题实质并无影响。但需要结合级次 k 取值的物理意义给出干涉条件的具体表达式,表

达式必须与所取干涉级次 k 相协调。显然当存在奇数次半波损失时,附加光程差表示为 $+\frac{\lambda}{2}$ 时,干涉条件表达式更简洁,也更方便理解干涉级次 k 取值的物理意义。

参 考 文 献

- [1] 赵凯华. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 117-118.
- [2] 赵近芳, 王登龙. 大学物理学(下)[M]. 5版. 北京: 北京邮电大学出版社, 2017: 121-127.
- [3] 马文蔚, 周雨青, 解希顺. 物理学教程(下)[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 190-195.
- [4] 沈临江, 蔡永明, 周宏宇. 大学物理简明教程[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2013: 189-196.
- [5] 姚启钧. 光学教程[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 35-42.
- [6] 苏润洲, 陈小凡, 汤冬华. 光程的概念与薄膜干涉中光程差的表示方法[J]. 高师理科学刊. 2014, 34(6): 43-45.
SU R Z, CHEN X F, TANG D H. Concept of optical path and representation method of optical path difference in thin film interference[J]. Journal of Normal University Science, 2014, 34(6): 43-45. (in Chinese)
- [7] 李玉强. 干涉实验明暗条纹公式及条纹级次的讨论[J]. 伊犁师范学院学报(自然科学版), 2016, 10(1): 91-96.
LI Y Q. Journal of Yili Normal University (Natural Science Edition). 2016, 10(1): 91-96. (in Chinese)
- [8] 左武魁, 周惟公, 魏民云, 等. 半波损失的形成和机理分析[J]. 物理通报, 2019(1): 33-35.
ZUO W K, ZHOU W G, WEI M Y, et al. Formation and mechanism analysis of half-wave loss[J]. Chinese Physics Bulletin, 2019(1): 33-35. (in Chinese)
- [9] 李均, 钱程屹, 马墨南, 等. 大学物理中波动问题的关键点分析[J]. 大学物理, 2020, 39(9): 9-16.
LI J, QIAN C Y, MA M N, et al. Key points analysis of wave problem in university physics[J]. University Physics, 2020, 39(9): 9-16. (in Chinese)
- [10] 曹卫军. 薄膜干涉中半波损失与附加光程差的讨论[J]. 昌吉学院学报, 2018, 12(6): 104-109.
CAO W J. Discussion on half-wave loss and additional optical path difference in thin film interference[J]. Journal of Changji University, 2018, 12(6): 104-109. (in Chinese)
- [11] 曹冬梅. 再论光波的半波损失[J]. 延安大学学报(自然科学版). 2017, 36(1): 41-42.
CAO D M. Rediscovery on half-wave loss of light wave[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2017, 36(1): 41-42. (in Chinese)
- [12] 王小平, 江键, 许佳捷. 波动光学条纹公式及其条纹级次的讨论[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(1): 4-5.
WANG X P, JIANG J, XU J J. Experimental Science and Technology, 2015, 13(1): 4-5. (in Chinese)